

# УПРАВЛІННЯ СТРУКТУРОЮ ПОТОКУ ТА ТЕПЛОВІДАЧА В КАНАЛІ ПРЯМОКУТНОЇ ФОРМИ З ПОВЕРХНЕВИМИ ЗАГЛИБЛЕННЯМИ ОВАЛЬНО-ЦИЛІНДРИЧНОЇ ФОРМИ

І. А. Сафіюлін<sup>1, а</sup>, А. А. Халатов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,  
Фізико-технічний інститут

<sup>2</sup>Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ

## Анотація

У даній роботі наведено результати комп'ютерного моделювання інтенсифікації потоку та тепловіддачі в каналі прямокутної форми за допомогою нанесення на неї овально – циліндричних заглиблень під кутом  $\theta = 45^\circ$  до набігаючого потоку в залежності від швидкості потоку. Проведено аналізу впливу гідродинаміки на тепловіддачу в серединному перерізі каналу та в пристінній області.

**Ключові слова:** овально-циліндричні заглиблення, комп'ютерне моделювання, інтенсифікація потоку та тепловіддачі

## Вступ

В наш час теплообміні пристрої знайшли широке використання в багатьох сферах діяльності: машинобудування, харчова промисловість, холодильні установки, в системах опалення, водопостачання та інших. Наприклад відведення теплоти від установок та перетворення цієї теплоти в будь – який корисний ресурс для людства. Із збільшенням кількості таких систем, а також їх постає питання щодо вивчення можливих процесів інтенсифікації та управління потоком, що дозволяє не тільки покращити вже існуючі механізми, але й зменшити їх розміри, підвищити ККД у випадку теплових установок, або зниження температурного напору порівняно з тим, що досягається в стандартній ситуації.

Інтенсифікація – це процес організації розвитку виробництва, в якому використовують найбільш ефективні методи або ж використання обладнання нового типу, що дозволяє підвищує продуктивність.

Актуальність в техніці також пов'язання з вирішенням таких основних задач, як:

- 1) Збільшити тепловідвід при заданих параметрах швидкостей та тисках, що є важливим для ядерних, термоядерних енергоустановках та інших станцій.
- 2) Зменшення розмірів поверхні тепловідведення приблизно в 1.5 – 2 рази, що дозволяє виготовляти більш компактні установки.
- 3) Зменшення часу на охолодження енергоустановок.

Тому задача інтенсифікації процесу теплообміну та виготовлення високоефективних установок є актуальним питанням не тільки в енергетиці, а й взагалі.

На даний момент відомі такі методи інтенсифікації, як:

- 1) турбулізатори, що встановлюються для підвищення швидкостей потоку, що впливає на більш високу тепловіддачу.
- 2) зміна термічного опору
- 3) збільшення площі
- 4) використання матеріалів, що мають кращі властивості теплопровідності
- 5) закрутка потоку використовуючи різні виступи в середині каналів
- 6) роблячи штучні шероховатості на внутрішній поверхні обтікаючого тіла.
- 7) використовуючи завихрителі
- 8) роблячи заглиблення

На теплообмін вплив має не тільки швидкість набігаючого потоку, а й геометрія тіла, яке приходить в контакт з потоком. Також вплив на тепловіддачу визначається товщиною променевого шару зробленої в порожнині [1]. Геометрія порожнини суттєвим чином впливає на вихрову структуру потоку всередині порожнини.

Методи управління розбивають на пасивні та активні. До перших належать всі вище сказані методи, адже вони не потребують підведення додаткової енергії до системи на відміну від активних. При чому слід зазначити, що ефективність інтенсифікації при різних способах істотно різна. Так при певних умовах одні методи можуть себе проявляти краще за інші і навпаки.

Для управління потоку використовують заглиблення різних форм. Серед всіх існуючих видів заглиблень найкраще за все себе зарекомендували овально-циліндричні. Такі порожнини генерують інтенсивно спіральні структури потоку зі середньою швидкістю,

<sup>а</sup>ivansaiulin@myrambler.ru

яка порівняна зі швидкістю в каналі із гладкими стінками.

Овально-циліндричні заглиблення впливають на перебудову вихрової структури обтікання, що ефективно росте. Виявилося, що при обтіканні турбулентним потоком такі заглиблення значно краще себе проявляють за інші геометрії такої ж площі. На інтенсивність вихроутворення також має вплив кут нахилу порожнини по відношенню до набігаючого потоку. Оптимальним кутом вважають кут від  $\theta = 45^\circ - 60^\circ$  [2].

В результаті досліджень було встановлено, що поле повздовжньої компоненти швидкості в каналі за рахунок такої геометрії за заглибленням буде зміщуватися вбік правої частини каналу. В правій частині каналу з являється зона, де повздовжня швидкість більша за максимальну швидкість у випадку тих самих процесів на плоско паралельній пластині. Зміщення швидкості тісним чином залежить від параметрів каналу та заглиблень [1].

Зроблені дослідження висоти заглиблення дають наступні результати: з ростом глибини овального заглиблення виникають зони максимумів та мінімумів в лівій частині каналу, що також є вихровими структурами, при цьому основний вихрь локалізується в області правої частини каналу [3].

## 1. Постановка задачі

В даній роботі розглядається турбулентна течія в каналі прямокутної форми з овально-циліндричними заглибленнями зі швидкістю набігаючого потоку  $2 \frac{m}{c}$   $Re = 1.13 \cdot 10^4$ . Модель інтенсифікації нестационарного потоку повітря проведена для каналу прямокутної форми протяжністю 7.82 шириною 2.7 та висотою 1 з нанесеними на нижню грань заглибленнями овально-циліндричної форми з фіксованими кутом нахилу до набігаючого потоку під кутом  $\theta = 45^\circ$ , шириною 0.38, довжиною 2.6 та висотою 1. Всі параметри представлені в безрозмірному вигляді та віднесені до висоти каналу. Заглиблення побудовані за допомогою зшивки двох сфер та циліндру. Для розрахунків використовувалось гаряче повітря при температурі  $T = 353$  К. Температура стінок підтримується при постійній температурі  $T = 298$  К. Введено зручну систему координат  $x, y, z$  в ядрі потоку де вісь  $x$  напрямлена вздовж каналу, а вісь  $y$  — поперек. Всі результати, що будуть надані нижче були отримані в той час, коли система вже вийшла на стаціонарний режим. Крива виходу на стаціонарний режим для  $Re = 1.13 \cdot 10^4$  має вигляд експоненційно згасаючої функції та становить  $\tau = 0.25$  с.

## 2. Чисельне моделювання

Розрахункова область являє собою канал прямокутної форми на дні якого на відстані 2.17 вздовж осі  $x$  розташоване перше овально-циліндричне заглиблення під кутом  $\theta = 45^\circ$  та паралельно нього на відстані 5.22 від початку координат знаходиться друге(всі параметри піднесені до висоти каналу).

В якості математичної моделі поставленої задачі вибрано систему рівнянь Нав'є-Стокса для стислого середовища.

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \rho + \rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \\ \rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} + \nabla P = \nabla \tau \\ \rho \frac{\partial e}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) e + P \nabla \cdot \mathbf{u} = \Phi - \nabla \cdot \mathbf{q} \end{cases}$$

де  $\mathbf{u} = (u_x, u_y, u_z)$  — вектор швидкості,  $P$  — тиск,  $\rho$  — густина.

- Рівняння стану

$$P = \rho RT,$$

$$\text{де } R = \frac{\mathcal{R}}{M}, \mathcal{R} = 8.31 \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}}.$$

- Тензор в'язких напруг

$$\tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right),$$

де  $\mu$  — в'язкість

- Внутрішня енергія

$$e = c_v T = \frac{RT}{\gamma - 1},$$

де показник адіабати  $\gamma = 1.4$ ,

- Дисипативна функція

$$\Phi = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j},$$

- Потік тепла

$$\mathbf{q} = -k \nabla T$$

де  $k = \frac{\mu c_p}{RT}$  — теплопровідність.

В якості моделі турбулентності використана  $k - \varepsilon$  модель, яка дуже добре себе зарекомендувала та використовується у роботах Ісаєва [1, 2, 3] :

$$\begin{cases} \frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial (k u_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\nu_t}{\sigma_e} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + 2 \nu_t E_{ij} E_{ij} - e \\ \frac{\partial e}{\partial t} + \frac{\partial (e u_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\nu_t}{\sigma_e} \frac{\partial e}{\partial x_j} \right) + C_{1e} \frac{e}{k} 2 \nu_t E_{ij} E_{ij} - C_{2e} \frac{e^2}{k} \end{cases}$$

де  $\nu_t$  — турбулентна кінематична в'язкість,  $E_{ij}$  — компоненти тензора швидкості деформації,  $e$  — швидкість дисипації енергії турбулентності,  $k$  — кінетична турбулентна енергія.

Всі рівняння розв'язуються за граничним умов прилипання на стінках, постійної швидкості на вході, постійної температури стінок каналу та потоку, атмосферного тиску на вході та на виході з каналу.

Для розрахунку самих рівнянь використовувався пакет **OpenFoam** [4]. В основі пакету лежить метод скінчених об'ємів. Робочою мовою програмування є об'єктно-орієнтована мова програмування **C++**, що дає змогу швидких розрахунків, порівняно з іншими мовами програмування. Наступною перевагою **OpenFoam** є гнучкість, щодо задання граничних умов.

Для побудови сітки використовувався безкоштовний пакет програм **SALOME** [5]. Було побудовано Tetrahedral структуровану сітку, схема якої представлена на рис. 1. Було вирішено будувати саме таку сітку, через невеликі проблемні місця з'єднання геометрії. Візуалізація результатів розрахунків виконувалася з використанням відкритого графічного пакету **ParaView** [6].

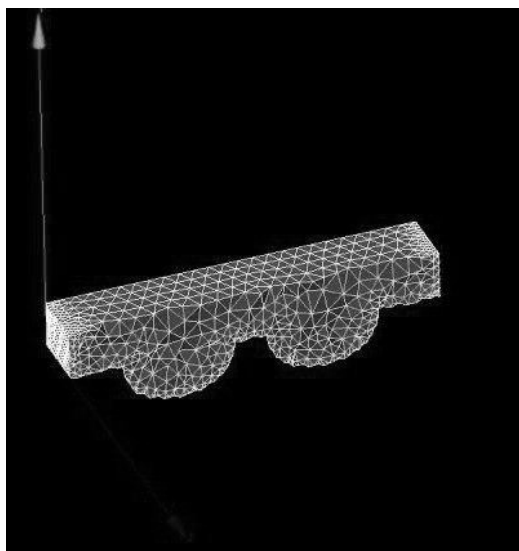


Рис. 1. Схема побудови Tetrahedral структурованої сітки

Сітка побудована за наступним алгоритмом :

- 3D – NETGEN 3D
- 2D –NETGEN 2D
- 1D – Wire Discretisation

### 3. Результати розрахунків

Результатами розрахунків є те, що поле повздовжньої компоненти швидкості в даному каналі за рахунок такої геометрії та взаєморозміщення заглиблень по відношенню до потоку буде зміщуватися вбік правої частини каналу вздовж вибраної нами осі  $z$ , що в загальному випадку впливає на тепловіддачу.

Аналіз течії говорить, що в зоні заглиблення є наявність високих швидкостей, що говорить про те, що в цій зоні є інтенсивне утворення вихрових структур за рахунок наявності точки відриву перед заглибленням та точкою приєднання потоку поблизу задньої стінки заглиблення. Аналізуючи поля кінетичної турбулентної енергії була знайдена зона біля задньої кромки заглиблення, де ця енергія має найбільше значення, що також підтверджується с полями розподілу швидкостей. Аналіз полів тисків дав наступний результат: за заглибленням були знайдені криві, де тиск набував мінімального значення, що говорить про те, що в цих місцях відбувається інтенсивний викид вихрових структур, утворених за допомогою заглиблень. На рис 2 та рис. 3. зображено профілі модуля швидкості для параметрів потоку  $Re = 1.13 \cdot 10^4$  вздовж осі  $z$  розташованої посередині висоти каналу на відстанях 3.7, 6.74 від початку каналу вздовж осі  $x$ .

Отримані зміщення є доволі невеликими. Причиною цього може бути те, що в даній моделі використовувались доволі глибокі заглиблення по відношенню до висоти каналу, тому інтенсифікація щодо профілю швидкостей вимагає додаткових досліджень пов'язаних з відношенням геометрії каналу до геометрії порожнин.

На рис. 4 та рис. 5. представлені графіки залежності коефіцієнту тепловіддачі на фіксованих лініях

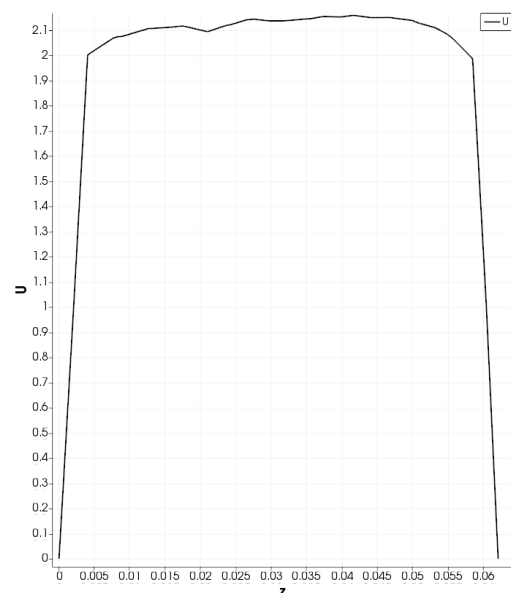


Рис. 2. Модуль швидкості поміряний вздовж осі  $z$  на відстані 3.7 від початку каналу вздовж осі  $x$  для  $Re = 1.13 \cdot 10^4$

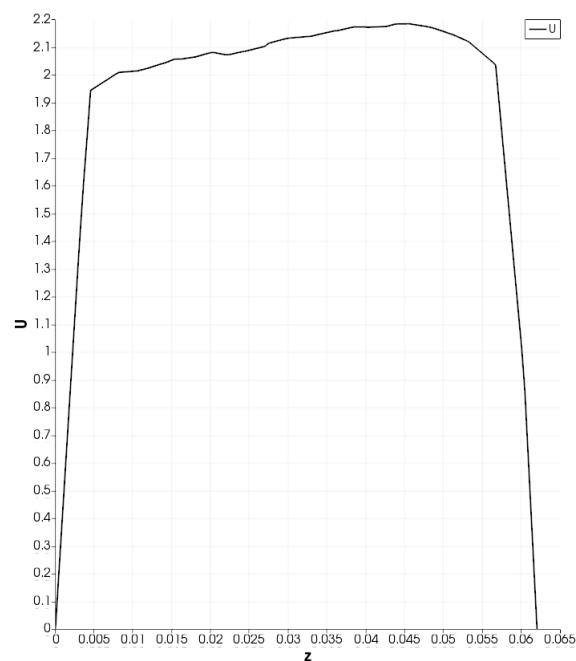


Рис. 3. Модуль швидкості поміряний вздовж осі  $z$  на відстані 6.86 від початку каналу вздовж осі  $x$  для  $Re = 1.13 \cdot 10^4$

вздовж осі  $z$  розташованої посередині висоти каналу на відстанях 3.7, 6.74 від початку каналу вздовж осі  $x$ .

З рис. 4 та рис. 5 можна побачити, що незначні збільшення модуля швидкості вздовж осі  $z$  приводить до збільшення коефіцієнту тепловіддачі в тому ж самому напрямку. Тобто тепловіддача повторює профіль швидкості.

Було встановлено, що найнижчі показники коефіцієнту тепловіддачі знаходяться у пристіному шарі. Це говорить про те, що біля стінок є проміжеві шари: гідродинамічний та температурний, що сприяють

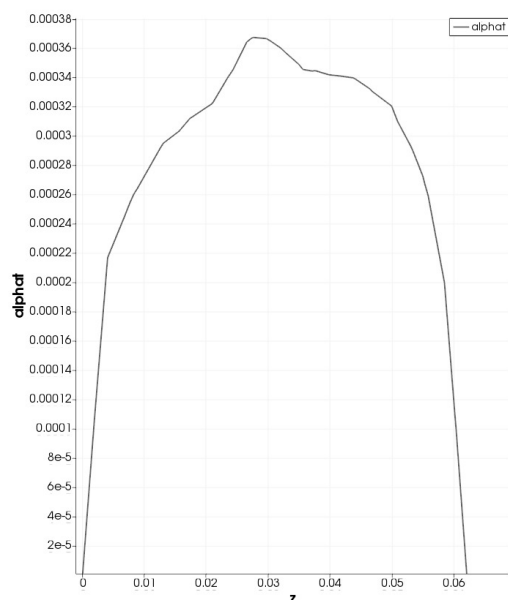


Рис. 4. Значення коефіцієнту тепловіддачі вздовж осі  $z$  на відстані 3.7 від початку каналу вздовж осі  $x$  для  $Re = 1.7 \cdot 10^5$

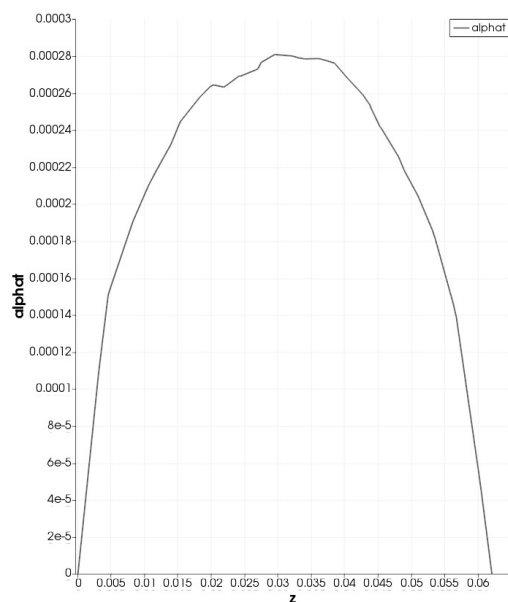


Рис. 5. Значення коефіцієнту тепловіддачі вздовж осі  $z$  на відстані 6.86 від початку каналу вздовж осі  $x$  для  $Re = 1.7 \cdot 10^5$

погіршеною тепловіддачі, але є пристінні зони, де навпаки коефіцієнт тепловіддачі досягає свого максимуму. Це відбувається в зонах викиду вихрив, там

де виникає найбільша турбулентна кінетична енергія за рахунок якої біля пристінної зони руйнується проміжний шар і як наслідок маємо кращі показники коефіцієнту тепловіддачі.

## Висновки

В даній роботі була запропонована модель та методика чисельного розрахунку у відкритому пакеті OpenFoam задачі інтенсифікації та управління потоком повітря при температурі  $T = 353$  К з відповідними теплофізичними параметрами та тепловіддачу всередині каналу прямокутної форми з нанесеними на поверхні каналу овально-циліндричних заглиблень з фіксованим кутом  $\theta = 45^\circ$  до набігаючого потоку для швидкості набігаючого потоку  $2 \frac{m}{s}$  ( $Re = 1.13 \cdot 10^4$ ).

- 1) Невеликий зсув швидкості потоку приводить до зсуву коефіцієнту тепловіддачі у тому ж напрямку.
- 2) Тепловіддача повторює профіль швидкості
- 3) Найнижчі показники коефіцієнту тепловіддачі знаходяться у пристінному шарі, що говорить про наявність проміжних шарів: гідродинамічного та температурного, що сприяють погіршеною тепловіддачі.
- 4) В області викиду вихрив у пристінній зоні тепловіддача досягає найбільшого значення.

## Перелік використаних джерел

1. S. A. Isaev, Leont'ev A. I., E. Hassel. Kornev, Ya. P. Chudnovskii. — 2 edition. — published in Teplofizika Vysokikh Temperatur, 2015. — P. 390–402.
2. Isaev S. A., Leontiev A. I., Usachov A. E. In Proceedings of the Fourth Asian Computational Fluid Dynamics Conference, Mianyang, China., — 2000. — P. 12.
3. Numerical Modeling and Physical Simulation of Vortex Heat Transfer Enhancement Mechanisms over Dimpled Relief / S. A. Isaev, Leont'ev A. I., E. Hassel. Kornev, Ya. P. Chudnovskii. — 14 edition. — IHTC, 2010. — P. 189. — ISBN: 978-0-07-338019-3.
4. OpenCFD CFD Direct. OpenFoam. — 2018. — Access mode: [www.openfoam.com](http://www.openfoam.com).
5. SAS OPEN CASCADE. Salome. — 2017. — Access mode: [www.salome-platform.org](http://www.salome-platform.org).
6. Inc Kitware. ParaView. — 2007. — Access mode: [www.paraview.org](http://www.paraview.org).